

Interaktion gemischter Bewehrungen bei der Verstärkung von Stahlbeton mit textilbewehrtem Beton*

Silvio Weiland¹, Manfred Curbach²

Zusammenfassung: Textile Bewehrungen stellen eine hervorragende Alternative zu bisherigen Verstärkungsmethoden dar. Die Wirksamkeit von Textilbetonverstärkungen konnte bereits eindrucksvoll nachgewiesen werden. Um sowohl die vorhandene Bausubstanz, als auch die Verstärkung optimal auszulasten, ist es erforderlich, das Zusammenwirken beider Bewehrungsarten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Verbundeigenschaften zu beschreiben. In diesem Beitrag wird das gemeinsame Tragverhalten von Betonstahl und textiler Bewehrung eingehend erläutert. Zur Veranschaulichung wird daher vor allem die Verbundtragwirkung und deren Einfluss auf gerissene Zugglieder genauer untersucht.

Summary: Textile reinforcement represents an excellent alternative to existing means for strengthening of concrete structures today. The effectiveness of textile reinforced concrete for strengthening has already been demonstrated impressively. To both the existing buildings, as well as the reinforcement to be used optimally, it is necessary to improve the interaction of both reinforcement types, taking into account the different bond characteristics. In this paper, the combined load bearing behaviour of textile and steel reinforcement is detailed. To illustrate is therefore especially the effect of different bond and its influence on tension member with mixed reinforcement investigated.

1 Bauen im Bestand

Der Wert der in Deutschland vorhandenen Bausubstanz wird von CURBACH [1] je nach Statistik auf 10 bis 25 Billionen Euro geschätzt. Jedem Einwohner von Deutschland „gehört“ damit der Gegenwert eines Einfamilienhauses in Höhe von 125.000 bis 312.500 Euro, veranschaulicht CURBACH diese Zahlen. Legt man eine mittlere Lebenserwartung der Bauwerke von 100 Jahren zugrunde, sollten demnach allein in Deutschland jährlich bis zu 250 Milliarden Euro in die Ersatzbeschaffung neuer Bauwerke ausgegeben werden. Da diese Summe

*Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244051366655-25294](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244051366655-25294)

¹Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

²Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

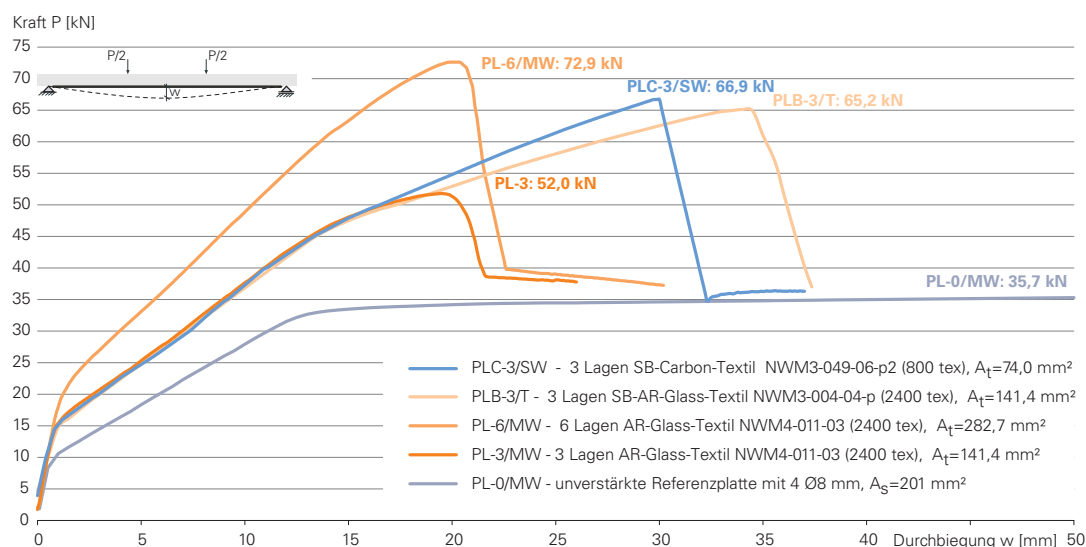


Bild 1: Vergleich unterschiedlicher textiler Bewehrungen zur Biegeverstärkung von Stahlbetonplatten

Figure 1: Comparison of different textiles for flexural strengthening of RC-slabs

durch die tatsächlichen Investitionen bei weitem nicht erreicht wird, ist folglich eine deutliche Vergrößerung der Nutzungsdauer der vorhandenen Bausubstanz erforderlich. In Folge dessen ist eine entsprechende Pflege und Instandhaltung unerlässlich. Abgesehen vom ideellem oder/und historischem Wert ist ein Abriss und Neubau bestehender Bausubstanz mit gleich bleibender architektonischer Qualität im Regelfall wesentlich teurer. Gegenüber dem Neubau gewinnt das Bauen im Bestand daher mehr und mehr an Bedeutung.

Neben der Anpassung an veränderte Nutzungen zeigen bestehende Bauwerke meist auch Alterungs- und Abnutzungserscheinungen und auch schon erhebliche Schäden an der Bausubstanz, die oft Maßnahmen zur Instandsetzung und Verstärkung erforderlich machen. Hinsichtlich einer Verstärkung bestehender Stahlbetonkonstruktionen können bisher klassische und etablierten Verfahren, wie beispielsweise Spritzbetonverstärkung mit Bewehrung und geklebte Lamellen aus Stahl oder Faserverbundkunststoffen verwendet werden. Bei der Wahl der geeignetsten Verstärkungsmaßnahme spielen konstruktive, bautechnologische und wirtschaftliche Belange des konkreten Objektes eine wesentliche Rolle. Jedes Verfahren bietet dabei verschiedene Vor- und Nachteile sowie Ausschlusskriterien, die durch einen erfahrenen Planer je nach Situation abgewägt werden müssen.

Textile Bewehrungen stellen eine hervorragende Alternative und Ergänzung zu den bisher verwendeten Verstärkungs- und Instandsetzungsmethoden dar und erweitern die Möglichkeiten enorm. Mit den Untersuchungen des Sonderforschungsbereiches 528 an der Technischen Universität Dresden konnte von CURBACH ET AL. beispielsweise in [2] die Wirksamkeit von textilbewehrten Feinbetonverstärkungen für Biegung, Querkraft, Torsion und Normalkraftum-schnürung nachgewiesen werden. Das verbesserte Verhalten im Gebrauchszustand und die teils erhebliche Bruchlaststeigerungen mit diversen beschichteten und unbeschichteten textilen Bewehrungen im Vergleich zu unverstärkten Referenzbauteilen zeigt Bild 1 exemplarisch

für in der Biegezugzone verstärkte Platten. Biegeverstärkungen wurde auch bereits in prototypischen Anwendungen, beispielsweise in WEILAND ET AL. [3] beschrieben, an einer HP-Schale der Fachhochschule Schweinfurt und an einem Schalentragwerk am neuen Finanzamt in Zwickau umgesetzt.

2 Zusammenwirken gemischter Bewehrungen

2.1 Hintergrund

Bereits 1938 wies KRÜGER, O. [4] vor dem Hintergrund, dass neben hochwertigem Betonstahl auch Sonderstähle und sogar Altstähle (ausgesonderte Gleise) im Betonbau verwendet wurden, auf die Besonderheiten der Kombination verschiedener Bewehrungen hin. Zwar ist die Betonstahlbewehrung inzwischen weitestgehend genormt, dennoch ist diese Erkenntnis immer noch aktuell. So werden bei Spannbetonbauteilen mit Spanngliedern und Betonstahl zwei Bewehrungen mit unterschiedlichem Verbundverhalten kombiniert. Auch bei allen Verstärkungstechniken, die eine Querschnittsergänzung zur Erhöhung der Tragfähigkeit zugbeanspruchter Tragwerkselemente vorsehen, muss die Zugkraft von der vorhandenen Stahlbewehrung gemeinsam mit dem neu aufgetragenen Zugglied mit einem meist anderen Verbundverhalten aufgenommen werden. Ebenso können die Kombination von Kunststoffbewehrungsstäben (GFK oder CFK) mit Betonstahl sowie der Einsatz von bewehrten Kurzfaserbetonen als gemischt bewehrte Zugglieder verstanden werden. Nicht zuletzt gehört natürlich auch die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit textiler Bewehrung dazu.

Das Zusammenwirken von Bewehrungen mit (stark) unterschiedlichen Verbundeigenschaften und Dehnsteifigkeiten und die daraus resultierende gegenseitige Beeinflussung von Spannungen und Verformungen ist für die Beurteilung des Tragverhaltens gemischt bewehrter Bauteile von entscheidender Bedeutung. Beispielsweise können selbst bei gleicher Zugkraftbeanspruchung beider Bewehrungen die Dehnungen im Riss durch unterschiedliche Verankerungslängen stark voneinander abweichen. Die Annahme einer ebenen Dehnungsverteilung im Riss trifft meist nicht zu (vgl. TROST [5] und ZEHETMAIER [6]). Aus Sicht der Verträglichkeit betrachtet ist der Schlupf der Bewehrung im Riss durch die Geometrie der Rissöffnung zwar vorgegeben, jedoch ist die diesem Schlupf entsprechende Kraft in der Bewehrung von der Verbundsteifigkeit abhängig. Ebenso können sich Rissbreiten und Rissabstände der jeweiligen Bewehrungen gegenseitig beeinflussen. Neben Einflussgrößen auf das Verbundverhalten der einzelnen Bewehrungselemente an sich wird die Zugkraftaufteilung maßgeblich geprägt von

- dem Verhältnis der Dehnsteifigkeiten $(E_1 A_1)/(E_2 A_2)$,
- dem Verbundverhalten (Verbundfestigkeit und -steifigkeit) und dessen Relation der unterschiedlichen Bewehrungselemente,
- Verhältnis zwischen verbundwirksamen Umfang zur Querschnittsfläche,

- dem jeweiligen Abstand der Bewehrungen zur neutralen Achse bzw. dem Verhältnis der Hebelarme zueinander,
- der Belastungsart sowie
- den Risszuständen und dem vorliegenden Rissbild.

Diese Einflüsse wurden an umfangreichen theoretischen und experimentellen Arbeiten zu Spannungsumlagerungen bei vorgespannten Bauteilen, beispielsweise von RUDLOF [7], und zum Zusammenwirken einbetonierter und geklebter Bewehrung, u. a. von ZEHETMAIER [6] identifiziert.

Für Textilbetonverstärkungen sind bisher nur sehr wenige derartigen Untersuchungen, u. a. von WÖRNER [8] bekannt. Jedoch auch bei der Kombination von Betonstahlbewehrung mit Textilien ist das unterschiedliche Verbundverhalten zu beachten. Zwar haben textile Bewehrungen meist eine wesentlich schlechtere Verbundfestigkeit als Betonstahlbewehrung. Allerdings ergibt sich aus dem günstigen Querschnitts-Oberflächen-Verhältnis eine wesentlich größere Verbundfläche, was zu einem besseren Verbundverhalten führen kann. Gegenüber geklebter Bewehrung treten keine Entkopplungserscheinungen auf und das Verbundverhalten textiler Bewehrungen ist grundsätzlich duktiler. Der Abfall der Verbundspannungen auf das sehr niedrige Niveau des Reibverbundes nach Versagen des Adhäsionsverbundes und die Besonderheiten des dem Trag- und Verbundverhalten von Multifilamentgarnen, wie z. B. von LEPENIES [9] beschrieben, sind jedoch zu beachten.

Für textilbetonverstärkte Stahlbetonbauteile wird in diesem Beitrag daher das gemeinsame Tragverhalten von Betonstahl und textiler Bewehrung vertieft. Die verbundbedingten Unterschiede und Umlagerungen werden dabei mit in Literatur und Normung eingeführten, jedoch hier nicht näher erläuterten, Kennwerten dargestellt. Für einen Überblick über Kennwerte zur Beschreibung von Umlagerung und Aufteilung der Zugkräfte sei auf WEILAND [10] verwiesen.

2.2 Allgemeines Tragverhalten

Bei gemischten Betonbewehrungen mit unterschiedlichen Material- und Verbundeigenschaften muss die Zugkraft gemeinsam aufgenommen und über Risse übertragen werden. Aus der Geometrie der Rissöffnung kann der Schlupf der Bewehrung im Riss zwar abgeleitet werden. Die diesem Schlupf entsprechende Kraft- bzw. Dehnungsaufteilung ist jedoch vom Verhältniswert der Dehnsteifigkeiten, den Verbundeigenschaften, dem Abstand der Bewehrungen zur neutralen Achse (Hebelarme) und den jeweiligen Risszuständen abhängig. Durch Materialschädigungen bei steigender Belastung – Rissbildung, Verbundschädigung oder Entkopplung – ist der Gleichgewichtszustand zudem lastabhängig.

Vereinfachend werden die Bewehrungskräfte meist unter der Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte im Riss (Hypothese von BERNOULLI und NAVIER) und unter Vernachlässigung der verbundbedingten Unterschiede berechnet, was allerdings nur für besondere Konfigurationen uneingeschränkt gültig ist. Zumeist weichen die Dehnungen mehr oder minder stark

von diesen Annahmen ab und die Kraftaufteilung ist nur ungenau. Je nach Bewehrungskombination hat der Einfluss der Verbundunterschiede unterschiedliche Auswirkungen. Besitzen beide Bewehrungsmaterialien ein Fließplateau, wie bei Betonstahl und Spannstahl in Spannbetonbauteilen oder geklebte Stahllaschen auf Stahlbetonbauteilen, und sind beide Dehnungen im Versagenszustand größer, hat das Verbundverhalten meist einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Tragfähigkeit, obgleich die Bruchverformungen divergieren. Bei geringerer Beanspruchung der Bewehrungen im Gebrauchszustand, beispielsweise für Rissbreiten- und Ermüdungsnachweise, müssen die unterschiedlichen Verbundsteifigkeiten jedoch berücksichtigt werden.

Solange andere kritische Versagenszustände wie Versagen der Betondruckzone oder Verbundversagen ausgeschlossen werden können, gelten die vorigen Aussagen auch, wenn nur eine der Bewehrungen ins Fließen kommt. Bei der Kombination von Klebebewehrung aus Faserverbundwerkstoffen, deren Werkstoffverhalten bis zum Bruch linear-elastisch ist, und Betonstahl trifft das wegen der möglichen Klebeverbundentkopplung indes nicht zu, weswegen nach ZEHETMAIER [6] für den gesamten Last- und Verbundbereich die Zugkraftumlagerungen berücksichtigt werden sollten. Obwohl auch textile Bewehrungen ein elastisch-sprödes Tragverhalten aufweisen, tendieren textilbetonverstärkte Stahlbetonbauteile wegen des duktileren Verbundverhaltens eher zu erstgenanntem Verhalten, wenn ein Versagen der Zugzone maßgebend wird. Durch sukzessives Versagen einzelner Filamente oder Rovings kann aber auch eine Lastumlagerung aus Dehnungs- bzw. Dehnsteifigkeitsunterschieden auftreten.

3 Auswirkung von Verbundunterschieden

Für die Kombination von Beton- und Spannstahl bzw. Betonstahl und geklebten Lamellen sind bereits umfangreiche Untersuchungen und Erkenntnisse vorhanden, wie die unterschiedlichen Verbundparameter – z. B. Bewehrungsdurchmesser, Verbundumfänge und Verbundfestigkeiten – die Kraftaufteilung beeinflussen. Da die Verhältnisse bei gemischter Bewehrung aus Betonstahl und Textilien stark von bisher Bekanntem abweichen und zudem noch sehr unterschiedliche E-Module auftreten können, sollen die folgenden Sensitivitätsbetrachtungen erste Hinweise geben, ob und wie diese Verbundunterschiede bewertet und in Berechnungen berücksichtigt werden sollten.

Einen ersten Anhalt, unter welchen Bedingungen eine nennenswerte Mitwirkung zu erwarten ist, zeigt ein Diagramm für gemischte Stahl- und Spannstahlbewehrung nach CORDES [11], das um die Verhältnisse textiler Bewehrungen erweitert wurde. Bild 2 stellt die Zusammenhänge zwischen vorhandenen Bewehrungsverhältnissen und sich daraus ergebenden mitwirkenden Verbundumfängen und damit auch die übertragbare Verbundkraft bzw. den Anteil der Mitwirkung an der gemeinsamen Kraftübertragung dar.

Für gleiche Verbundverhältnisse – Stabdurchmesser $D_p = D_s$ und Verhältnis der Verbundfestigkeiten $\xi = 1,0$ – ergibt sich die Mitwirkung entsprechend des Bewehrungsverhältnisses (Linie 1). Für Spannglieder wird diese Mitwirkung – selbst bei gleichen Verbundfestigkeiten $\tau_{pm} = \tau_{sm}$ – allein dadurch sehr stark eingeschränkt, dass Spannglieder in der Regel einen

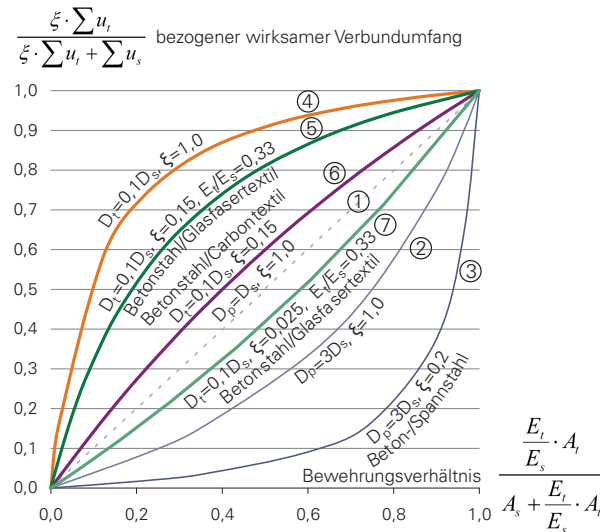
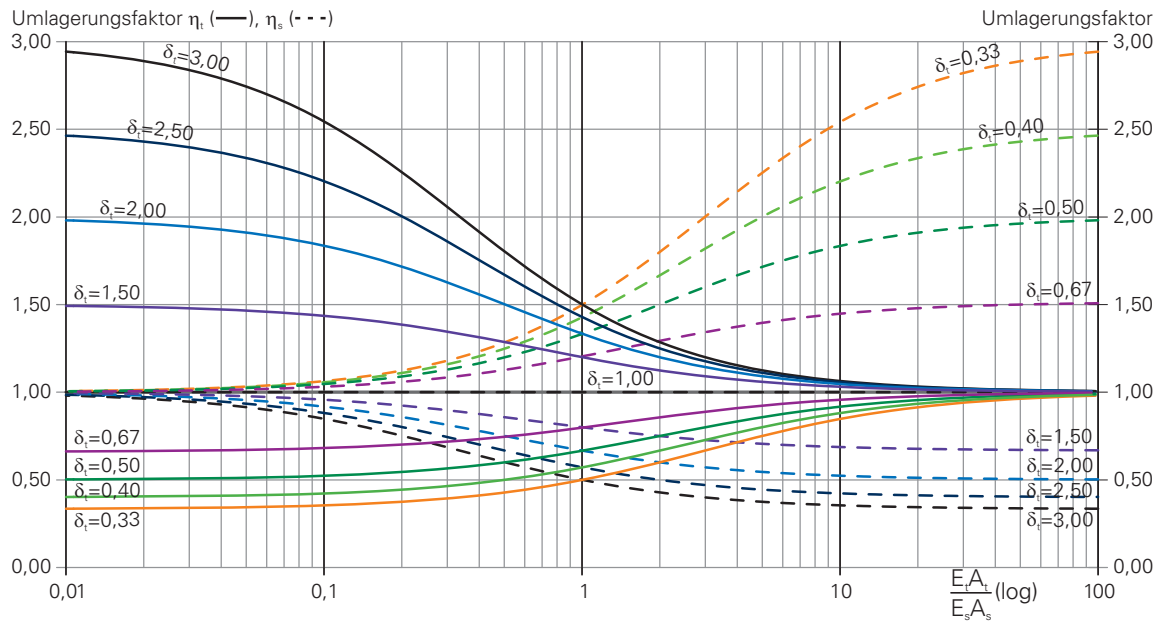
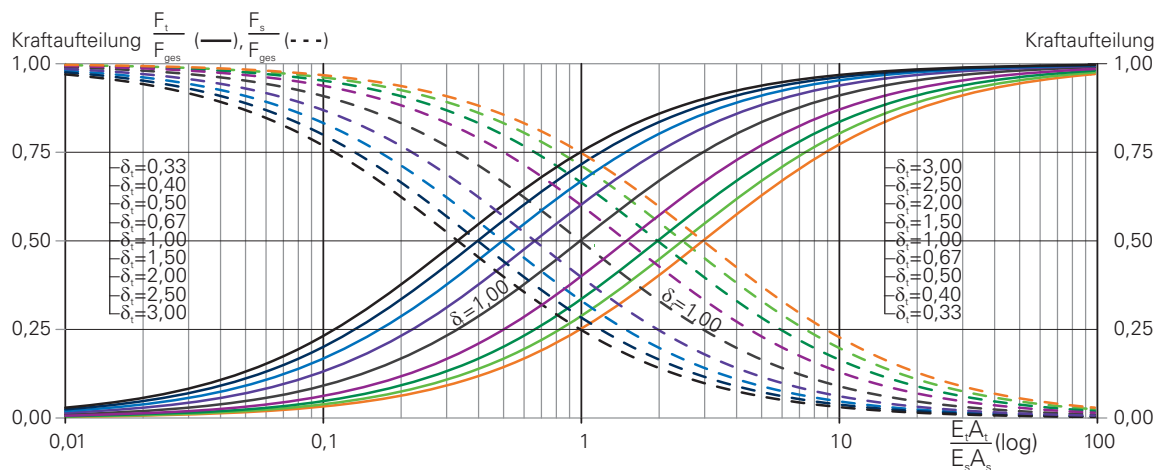
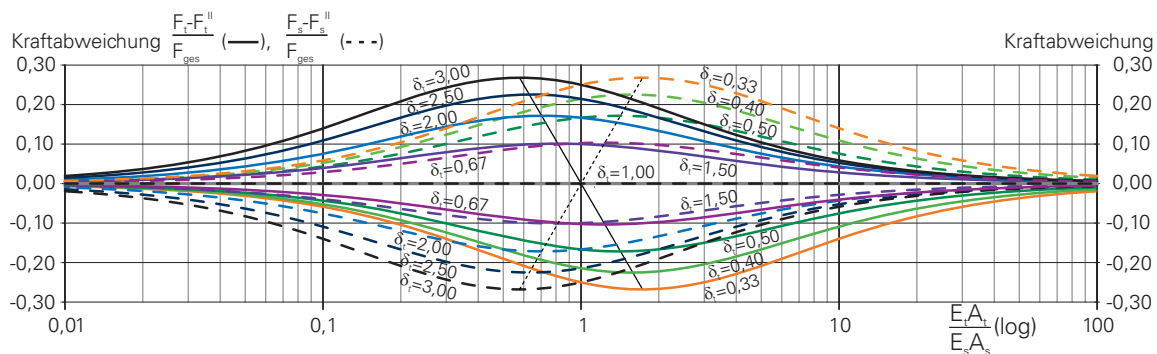


Bild 2: Einfluss von Verbundkennwerten und Bewehrungsverhältnis auf die Verbundkraftübertragung nach CORDES [11] erweitert um Betonstahl-/Textilbewehrungskombinationen

Figure 2: Influence of specific bond coefficient and reinforcement ratio on transfer of bond forces according to CORDES [11] expanded with different combinations of textile and steel reinforcement

wesentlich größeren Durchmesser als Betonstähle aufweisen und sich daraus ein ungünstigeres Umfangsverhältnis ergibt (Linie 2). Berücksichtigt man zusätzlich noch das teilweise sehr ungünstige Verhältnis der mittleren Verbundfestigkeiten $\xi = \tau_{pm}/\tau_{sm}$, das beispielsweise bei glatten Spannstählen nur einen Wert $\xi = 0,2$ erreicht, dann reduziert sich die Wertigkeit des vorhandenen Verbundumfangs und der Einfluss des Spanngliedverbundes tritt weiterhin zurück (Linie 3). Für textile Bewehrungen erwartet man wegen der kleinen Bewehrungsdurchmesser $D_t \approx 0,1 \cdot D_s$ und des damit vorhandenen günstigen Querschnitt-Oberflächen-Verhältnisses einen enormen Einfluss (Linie 4). Wegen des noch ungünstigeren Verhältnisses der Verbundfestigkeiten $\xi = 0,025 \dots 0,2$ als bei Spanngliedern wird dieser aber stark geschwächt (Linien 5 und 6). Zudem fällt die übertragbare Verbundspannung nach einem hohen Anfangswert schnell auf ein sehr niedriges Niveau ab, so dass trotz kleinem Umfang nur ein verhältnismäßig schwacher Einfluss auf die Rissbildung und das Tragverhalten bleibt. Im Extremfall könnten ähnliche Verhältnisse (Linie 7) wie bei Spanngliedern entstehen (Linie 6) und wo erst bei hohen Bewehrungsanteilen ein größerer Beitrag erbracht wird. Beachtet man weiterhin noch, wie beispielsweise bei AR-Glasfasern, die geringeren E-Module, stellt man einen günstigen Einfluss auf die Verbundkraftübertragung fest. Da für ein gleiches Verhältnis $E_t A_t / E_s A_s$ wesentlich mehr Querschnittsfläche erforderlich ist, steigt natürlich auch die vorhandene Verbundfläche an. Vergleicht man gleiche Querschnittsflächen, ist bei gleichen Geometrien und Verbundeigenschaften auch die Verbundfläche gleich, dann allerdings bei verschiedenen Dehnsteifigkeitsverhältnissen.

Eindeutiger lassen sich die Auswirkungen der Verbundunterschiede mit den Abweichungen der Spannungen bzw. Dehnungen von den Werten im idealen Zustand II (starrer Verbund) zei-

(a) Dehnungs-/Spannungsumlagerungen dargestellt mit Umlagerungsfaktoren η_t bzw. η_s (b) Kraftaufteilung F_t bzw. F_s 

(c) Abweichung der Kraftaufteilung gegenüber Zustand II bezogen auf die Gesamtzugkraft

Bild 3: Umlagerungen bei gemischten Bewehrungen infolge von absoluten Verbundunterschieden δ gegenüber idealem Zustand II (starrer Verbund) in Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse

Figure 3: Redistributions using mixed reinforcements due to absolute bond offsets δ compared with rigid bond subjected to ratio of extensional stiffnesses

gen. Für einen einfachen Zugstab ist in Bild 3(a) der Zusammenhang zwischen den Dehnsteifigkeitsverhältnissen $E_p A_p / E_s A_s$ und den Umlagerungsfaktoren η_t bzw. η_s für verschiedene absolute Verbundbeiwerte δ_t dargestellt.

Für gleiche Verhältnisse der Verbundeigenschaften ($\delta_t = 1, 0$) treten erwartungsgemäß keine Spannungsumlagerungen auf ($\eta_t = \eta_s = 1, 0$). Zugstäbe mit Betonstahl- und Spannstahlbewehrung haben je nach Vorspanngrad Bewehrungsverhältnisse $E_p A_p / E_s A_s \approx 1 \dots 10$ und weisen je Verbundart und Spannstahlsorte Verbundbeiwerte $\delta_p = \xi_1 = 0, 2 \dots 0, 9$ auf. Die Spannstahlbewehrung ist also im Vergleich zur Betonstahlbewehrung verbundweicher, was durch Verbundbeiwerte $\delta_p < 1, 0$ beschrieben wird. Diese Verbundbedingungen erhöhen die Spannungen in der für diesen Fall verbundsteiferen Betonstahlbewehrung (strichlierte Linie) wesentlich, während die Spannstahlspannungen (durchgezogene Linie) nur um das reziproke Verhältnis der Dehnsteifigkeiten entlastet werden. Bei textilbetonverstärkten Zugstäben ist die textile Bewehrung i. d. R. (zumindest im Bereich kleiner Rissöffnungen) verbundsteifer (vgl. Bild 2), was mit Verbundbeiwerten $\delta_t > 1, 0$ beschrieben werden kann. Die Bewehrungsverhältnisse $E_t A_t / E_s A_s$ liegen dabei meistens zwischen 0,1 und 1,0. Das führt zu wesentlichen höheren Dehnungen/Spannungen der textilen Bewehrung (durchgezogene Linie), wobei die Betonstahldehnungen/-spannungen (strichlierte Linie) nur wenig reduziert werden.

Grundsätzlich erkennt man in Bild 3, dass bei kleinen Verhältniswerten verbundsteiferer zu verbundschwächerer Bewehrung, d. h. bei kleinen Menge an verbundsteiferer Bewehrung, die Auswirkungen von Verbundunterschieden am Größten sind. Die Dehnungen bzw. Spannungen und damit auch die Kräfte der verbundsteiferen Bewehrung weichen wegen der großen Kraftdifferenzen zur Gesamtkraft stark vom idealen Zustand II ab. Die absoluten Größen der Kräfte in den beiden Bewehrungen sind natürlich von den Dehnsteifigkeitsverhältnissen abhängig, siehe Bild 3(b). Die Abweichungen der Bewehrungskräfte sind in Bild 3(c) bezogen auf die Gesamtkraft aufgetragen. Bei verbundbedingten Unterschieden außerhalb des Bereiches $0, 5 < \delta_t < 1, 5$ können die Differenzen der Kräfte in den Bewehrungen weit über 10 % der Gesamtkraft betragen. Bei kleinen Bewehrungsverhältnissen und damit geringen Anteilen an der Gesamtkraft entstehen somit leicht 50 ... 200 % Abweichungen der realen Bewehrungskraft zur nach Zustand II errechneten. Die enormen Auswirkungen auf die Dehnungen und Spannungen werden daher verständlich.

Aus den dargestellten Zusammenhängen können ebenfalls Konfigurationen für die experimentelle Untersuchung von Verbundunterschieden an Dehnkörpern abgeleitet werden, da nicht alle Größen mit gleicher Qualität gemessen werden können (vgl. auch ZEHETMAIER [6]).

Aus den bisherigen Zusammenhängen bleibt noch die Frage nach der Sensitivität des verwendeten Verbundbeiwertes δ_t . Dafür wird im Bild 4 in erster Näherung das für den Einzelrisszustand abgeleitete *Verhältnis der Lasteinleitungslängen*

$$\delta_t = \sqrt{\frac{\tau_{tm} \cdot U_t}{E_t A_t} \cdot \frac{E_s A_s}{\tau_{sm} \cdot U_s}} = \sqrt{\xi \cdot \frac{U_t}{U_s} \cdot \frac{E_s A_s}{E_t A_t}} = \sqrt{\xi \cdot \frac{E_s D_s}{E_t D_t}} \quad (1)$$

ausgewertet, das in Anlehnung u. a. an CORDES [11] aufgestellt wurde. Für vom Spannbeton bekannten Verhältnisse $E_s D_s / E_p D_p < 1$ ergeben sich unabhängig vom Verhältnis der

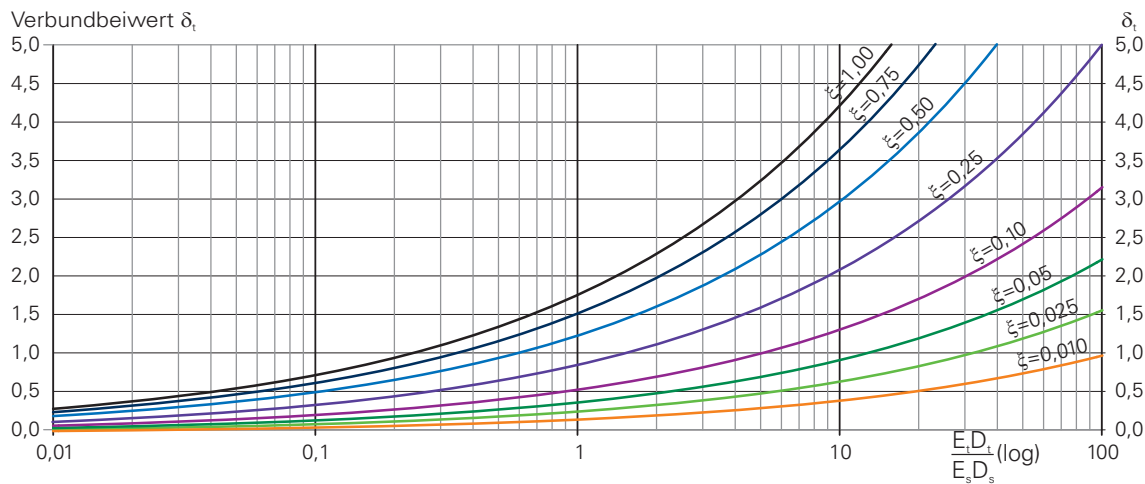


Bild 4: Verbundbeiwert δ_t in Abhängigkeit der Verbundeigenschaften

Figure 4: Absolute bond offsets δ_t subjected to bond properties

Verbundfestigkeiten ξ stets Werte $\delta_P < 1,0$, also eine höhere Beanspruchung der Betonstahlbewehrung. Nicht ganz so eindeutige Ergebnisse sind bei textilverstärkten Bauteilen zu erwarten. Das Umfangs-/Dehnsteifigkeitsverhältnis $E_s D_s / E_t D_t$ kann je nach Konfiguration zwischen 5 und weit über 50 liegen. Die Wurzelfunktion wird zwar durch die sehr geringen Verbundfestigkeitsverhältnisse $0,01 < \xi < 0,25$ gedämpft, aber dennoch ergeben sich Werte zwischen 0,5 und wesentlich über 1,0 (bis 4,0 scheint realistisch). Es kann also nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass die textile Bewehrung verbundsteifer ist. Zudem kann es während des Belastungsprozesses zu Schädigungen des Verbundes und/oder der Querschnittsfläche kommen, so dass die mittlere Verbundfestigkeit verringert bzw. das Verhältnis der Verbundfläche verändert wird, was wiederum zur Reduktion des Verbundbeiwertes und damit der Mitwirkung führen kann.

Aus den Sensitivitätsbetrachtungen kann abschließend gefolgert werden, dass die verbundbedingten Unterschiede für die Kombination von Betonstahl und Textilbewehrung einen starken Einfluss haben und bei der Zugkraftaufteilung und Ermittlung von Dehnungszuständen berücksichtigt werden müssen.

4 Verbundtragverhalten von Betonstahl und textiler Bewehrung

Für eine vertiefende Betrachtung der Auswirkung des unterschiedlichen Verbundverhaltens wurden in WEILAND [10] die Zusammenhänge von Spannungen und Verschiebungen durch Gleichgewichts- und Verformungsbeziehungen am differentiellen Stabelement mit gemischter Bewehrung nach Bild 5 als Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes hergeleitet. Allerdings weisen biegebeanspruchte Stahlbetonstäbe selbst unter Vernachlässigung des Querkrafteinflusses äußerst komplexe Zusammenhänge zwischen äußerer Belastung, inneren Kräften und Verformungen auf. Zwar ist der Beton im Rissquerschnitt jeweils spannungsfrei

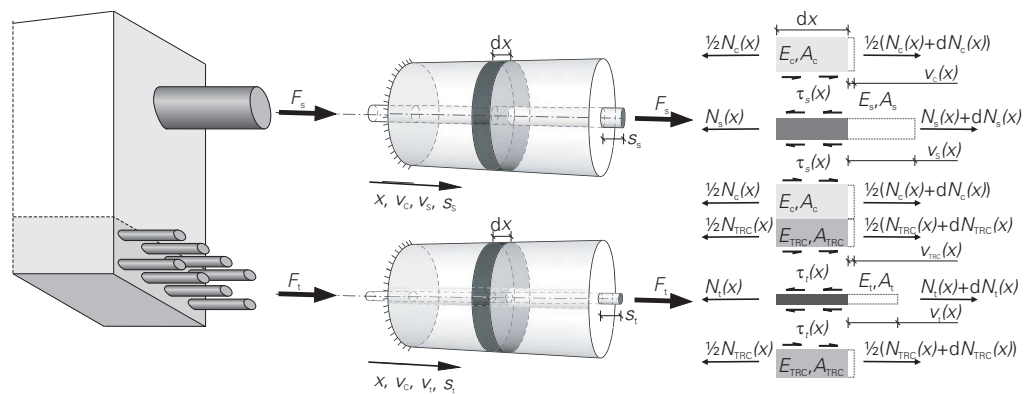


Bild 5: Modellvorstellung des Zusammenwirkens von Textil- und Stahlbewehrung

Figure 5: Model representation of textile-steel-reinforcement interaction

und die Kraft wird von den Bewehrungen allein übertragen aber anders als beim Zugstab herrschen hinsichtlich Geometrie und Beanspruchung asymmetrische Verhältnisse. Vereinfachend wird das Tragverhalten daher an einem zentrisch beanspruchten Zugstabmodell betrachtet.

Aufbauend auf einer u. a. von RUDLOF [7] angewandten numerischen Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes für gemischte Bewehrungen kann die Kraftaufteilung zwischen Stahlbewehrung und textiler Bewehrung ermittelt werden. Dafür wird die textile Bewehrung homogenisiert als stabförmige Bewehrung mit einer Querschnitts- und Verbundoberfläche aufgefasst. Grundlage hierfür sind Schubspannungs-Schlupf-Beziehungen, wie sie aus experimentellen Untersuchungen ermittelt werden können.

Durch Variation der Verbundparameter und Dehnsteifigkeitsverhältnisse wurde der Einfluss auf die Kraftaufteilung und Spannungsumlagerungen der Bewehrungsstränge beurteilt sowie ein besseres Verständnis für das Tragverhalten textilbetonverstärkter Stahlbetonkonstruktionen erarbeitet.

Verbundverhalten und Verhältnis der Dehnsteifigkeiten haben einen grossen Einfluss auf Kraftaufteilung und Spannungsumlagerung. Mit den in Bild 6 gezeigten Diagrammen können die Umlagerungseffekte veranschaulicht werden. Bild 6(a) zeigt die Aufteilung der Gesamtzugkraft Z auf die beiden Bewehrungen im Riss, deren Spannungen σ_s und σ_t aufgetragen sind. Die Kraft- bzw. Spannungsaufteilung im Verhältnis der Dehnsteifigkeiten ist beginnend mit dem Erstriss bis zum Fließbeginn der Betonstahlbewehrung zu erkennen. Die Auswirkung des unterschiedlichen Verbundverhaltens wird im Vergleich mit der Aufteilung nach idealem Zustand II – so als ob die Bewehrungen die Kraft allein ohne Verbundeinfluss mit ebener Dehnungsverteilung aufnehmen – deutlich. Durch die Umlagerungen wird natürlich auch die Kraft beim Fließbeginn Z_y gegenüber dem Zustand II Z_y^{II} beeinflusst. Ab dem Fließen der Betonstahlbewehrung wirkt die textile Bewehrung allein für eine weitere Steigerung der Belastung und wird daher stärker beansprucht. Die Rissöffnung und Dehnungen des Zugstabes werden damit von der textilen Bewehrung und deren Dehnsteifigkeit gesteuert, solange bis die Bruchdehnung einer Bewehrung im Riss erreicht wird. Die verbundbedingten Spannungsumlagerungen haben dabei nur noch untergeordnete Bedeutung. Die Spannungen im Betonstahl

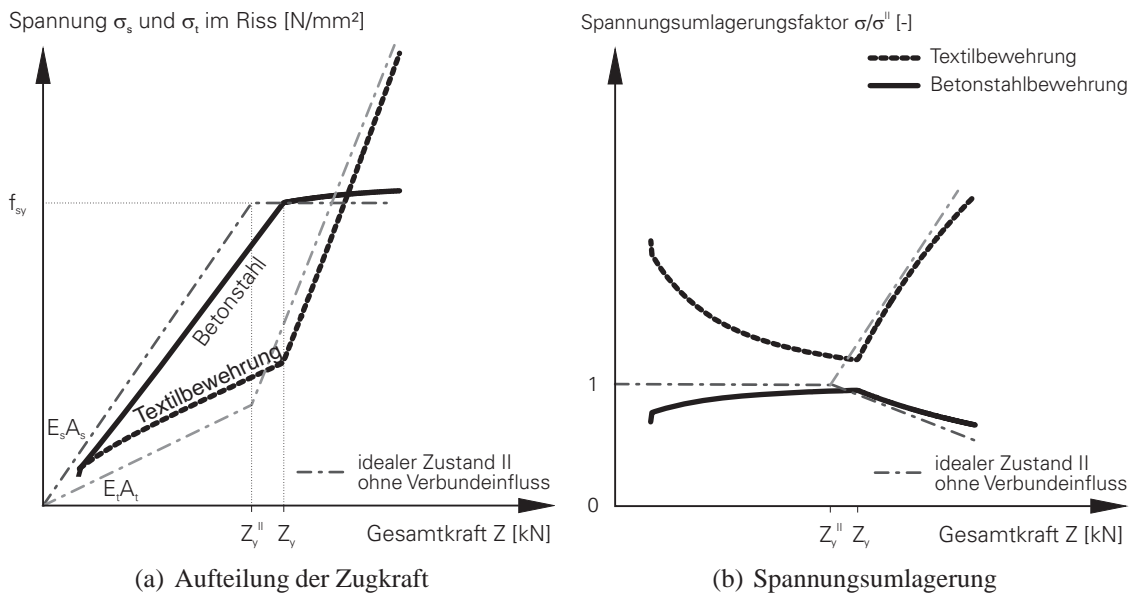


Bild 6: Allgemeine Darstellung von Kraftaufteilung und Spannungsumlagerung am Zugstab mit gemischter Bewehrung

Figure 6: General illustration of force distribution for a tension member with mixed reinforcement

und im Textil nähern sich dem idealen Zustand II an, wenn sich bei abgeschlossenem Rissbild keine unterschiedlichen Lasteinleitungslängen und Dehnungsunterschiede der Bewehrungen mehr ausbilden können.

Die Spannungsumlagerungen lassen sich mit Bild 6(b) hervorheben. Dort sind die Spannungen jeweils auf den idealen Zustand II, also ohne Berücksichtigung des Verbunds, bezogen. Umlagerungen auf die Bewehrung werden dabei mit Faktoren größer als Eins, Entlastungen hingegen mit Werten kleiner als 1,0 dargestellt. Ab dem Fließen einer Bewehrung dominiert allerdings die Dehnsteifigkeit der nichtfließenden Bewehrung die weitere Kraft- und Spannungsaufteilung.

5 Ausblick

Um sowohl die vorhandene Bausubstanz, als auch die Verstärkung optimal auszulasten, ist es erforderlich, das Zusammenwirken beider Bewehrungsarten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Verbundeigenschaften zu beschreiben. Das unterschiedliche Verbundverhalten sollte dabei durch einen geeigneten „Verbundbeiwert“ berücksichtigt werden kann. Ein solcher Verbundbeiwert ist stets an konkrete Verbundeigenschaften eines Textil-Matrix-Systems in Kombination mit der Betonstahlbewehrung gebunden.

Ziel ist deshalb weiterhin die Erarbeitung einer konkreten Empfehlung zu geeigneten Verbundbeiwerten zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Verbundeigenschaften bei der Textilbetonverstärkungen und wie ein solcher Verbundbeiwert zu ermitteln wäre. Dazu sollten beste-

hende Bemessungsansätze für gemischte Bewehrungen und deren Einschränkungen analysiert werden. Mit einer Parameterstudie können dann Empfehlungen für eine Bemessung der Textilbetonverstärkung unter Berücksichtigung der Verbundeigenschaften erarbeitet werden.

6 Literatur

- [1] CURBACH, M.: Vom Wert des Bauens. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Gebaute Visionen : 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 1907–2007*. Berlin : Beuth-Verlag, 2007, S. 222–234
- [2] CURBACH, M.; JESSE, F.: Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit textilbewehrtem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), S. 78–81
- [3] WEILAND, S. ; ORTLEPP, R. ; HAUPTENBUCHNER, B. ; CURBACH, M. : Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures – Part 2: Application on a concrete shell. In: ALDEA C.-M. (ed.): *Proceedings of the ACI Fall Convention, Puerto Rico, 2007* ACI-SP-251-3, 2008 – CD-ROM
- [4] KRÜGER, O. : Die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Eisensorten im Eisenbetonbau. *Beton und Eisen* 37 (1938), S. 249–251
- [5] TROST, H. ; CORDES, H. ; THORMÄHLEN, U. ; HAGEN, H. : Teilweise Vorspannung – Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rissbildung und Rissbreitenbeschränkung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* Heft 310. Berlin : Ernst & Sohn, 1980
- [6] ZEHETMAIER, G. M.: *Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen*. Technische Universität München : Eigenverlag, 2006 – Dissertation
- [7] RUDLOF, M. : *Zur Spannungsumlagerung zwischen Spannstahl und Betonstahl bei Spannbeton mit nachträglichem Verbund*. RWTH Aachen : Eigenverlag, 1998 – Dissertation
- [8] WÖRNER, J.-D. ; DEUSSER, S. : Oberflächennahe Textilbewehrung im Stahlbetonbau. *Bauen mit Textilien* 1 (1998), S. 18–22
- [9] LEPENIES, I. G.: *Zur hierarchischen und simultanen Multi-Skalen-Analyse von Textilbeton*, Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2007 – Dissertation
- [10] WEILAND, S: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag – Dissertation (in Vorbereitung)
- [11] CORDES, H. : *Das Grenzflächenverhalten von Spanngliedern und seine Auswirkungen für den Verbundbaustoff vorgespannter Stahlbeton – Reibung, Verbund und Ermüdung von Spanngliedern*. RWTH Aachen : Eigenverlag, 1987 – Habilitation